

北京市农业土壤重金属状态评价

霍霄妮¹, 李 红², 孙丹峰¹, 李保国¹, 周连第²

(1.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2.北京市农林科学院综合发展研究所, 北京 100097)

摘 要:以北京市土壤重金属背景值为标准,对比分析了农业土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 8 种重金属的含量及累积情况,并采用单因子污染指数法和综合污染指数法进行了土壤重金属污染评价。结果表明,北京市农业土壤存在着一定的 Cr、Cu、Zn、As、Cd 累积趋势,其含量的平均值分别为 53.61、21.95、65.42、9.14、0.125 mg·kg⁻¹,比相应的背景值高 79.9%、17.4%、13.8%、28.9%、5.0%;Ni 和 Pb 的累积则不明显,平均值比相应的背景值低 7.9%、29.2%,分别为 24.84 和 19.04 mg·kg⁻¹;而 Hg 含量的平均值与背景值一致,为 0.08 mg·kg⁻¹。从单因子评价结果来说,Cr 污染指数在 1.06~2.93 之间,所有的样点都处于轻度或中度污染状态;As、Cu、Zn、Cd 的污染指数相对较小,平均值分别为 1.29、1.17、1.13、1.05,有 50%以上的样点处于轻度污染状态;而 Ni、Pb、Hg 的污染指数均小于 1,有 60%以上的样点处于清洁或尚清洁状态,污染较轻。若从综合评价结果来说,综合污染指数处于 0.96~2.16 之间,平均值为 1.45,几乎所有的土壤样点都属于轻度污染状态。

关键词:北京市;农业土壤;重金属;状态评价

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0066-06

Status Assessment of Heavy Metals in Beijing Agricultural Soils

HUO Xiao-ni¹, LI Hong², SUN Dan-feng¹, LI Bao-guo¹, ZHOU Lian-di²

(1.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2.Institute of Comprehensive Research, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: To evaluate the status of heavy metals in Beijing agricultural soil, 385 soil samples were collected and the concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg were analyzed with the standardized method. Heavy metals were evaluated using the single-factor pollution index and the integrated pollution index based on the background level of heavy metals of Beijing. The results indicated that the mean concentration of heavy metals Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg were 53.61, 24.84, 21.95, 65.42, 9.14, 0.125, 19.04 mg·kg⁻¹ and 0.08 mg·kg⁻¹, respectively. The Cr, Cu, Zn, As, Cd content were 79.9%, 17.4%, 13.8%, 28.9%, 5.0% higher, while the Ni, Pb were 7.9%, 29.2% lower than the corresponding background concentrations, and Hg was consist with its background concentration. Thus, the Cr, Cu, Zn, As, Cd had obvious accumulative trends. Cr, As, Cu, Zn and Cd had significant increase with 1.80, 1.29, 1.17, 1.13 and 1.05 single-factor pollution index, respectively, especially Cr had the higher risk of pollution. For Hg, Ni and Pb, the mean values were 0.96, 0.93, 0.77, above 60% of samples had low or mid-level pollution index. Furthermore, the integrated pollution index of all samples ranged from 0.96 to 2.16 with an average of 1.45, which indicated that most of samples were slightly polluted.

Keywords: Beijing; agricultural soil; heavy metals; status assessment

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一,也是生态环境的重要组成部分。随着工业、城市污染的加剧和农用化学物质种类、数量的增加,土壤环境受到严重污染,其中重金属是土壤重要污染物之一。在过去的

50 年中,粗略统计排放到全球环境中的 Cr 2.2×10⁴ t、Cu 9.39×10⁵ t、Pb 7.83×10⁵ t、Zn 1.35×10⁶ t,其中大部分进入土壤,致使世界各国土壤出现不同程度的重金属污染^[1]。我国部分地区的土壤重金属污染也相当严重^[2-4]。由于重金属污染物在土壤中的移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解,会对农作物的品质产生一定的影响,还可以通过食物链进入人体,危害人类健康,国内外已广泛关注土壤重金属污染问题^[5-9]。

北京将发展都市型现代农业,随着农业由数量向

收稿日期:2008-02-26

基金项目:国家科技支撑项目资助(2006BAD10A06-03)

作者简介:霍霄妮(1981—),女,山西运城人,博士,主要从事农业非点源污染研究。

通讯作者:李 红 E-mail:lihdsf@sina.com

质量型转变,了解土壤环境质量的现状日益重要^[10]。目前,已有一些研究者对北京市重金属进行了研究,主要集中在基本农田、菜地、污灌区、公园等,且采样数量较少^[2,10-19]。有研究者对北京市不同土地利用方式(菜地、麦地/玉米地、稻田、自然土壤、果园、绿化地)下重金属的积累及污染风险进行了研究,但研究的重点是揭示不同土地利用类型的土壤重金属累积特征及土地利用方式对土壤重金属累积的影响^[20-25]。为了解近年来农业活动(包括化肥、有机肥的施用、农药的使用和污灌等)对土壤中重金属的影响,本文以北京市土壤重金属背景值为标准,对比分析了 8 种重金属的含量及累积情况,并对北京市农业土壤中重金属污染进行了评价,为北京市发展无公害农产品生产、农业产业结构规划以及环境治理等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

土壤重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg)含量监测数据均采用混合样的采集方法,共采集土壤样品 385 个。样点用 GPS 精确定位,每一样点在直径 100 m 范围内采用四分法选取 1 kg 的表层土(0~20 cm)混合均匀。样点分布见图 1。

土样在室内风干、磨碎,过 100 目尼龙网筛。样品的混合、装袋、粉碎、研磨等处理都采用木头、塑料或玛瑙用具。土壤样品的重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg)分析测定按照国家标准执行,分析过

程中加入国家标准土壤样品(GSS-1)进行分析质量控制,分析过程中所用试剂均为优级纯,所用水均为亚沸水。

1.2 数据处理

用 РайТа 检验法($\mu \pm 3\sigma$, μ 为样品均值、 σ 为样品均方差)对数据进行异常值剔除,得到 370 个有效点的数据。统计分析采用 SPSS 13.0 软件完成,样点分布图采用 ArcView3.2 软件完成。

1.3 土壤重金属环境质量评价方法

本文以北京市土壤重金属背景值^[26-27]为评价标准(表 1),采用单因子污染指数和综合污染指数^[28]相结合的方法,对 8 种重金属污染进行评价,计算公式如下:

$$\text{单项污染指数: } P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为污染物 i 的单项污染指数, C_i 是污染物实测值, S_i 是污染物背景值。当 $P_i \leq 1$, 表示土壤未受污染;当 $P_i > 1$, 表示土壤受到污染,再进行综合污染指数评价。综合污染指数采用内梅罗污染指数,计算公式如下:

$$\text{内梅罗污染指数: } P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{ave}})^2 + (P_{\text{max}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_{ave} 和 P_{max} 分别是平均单项污染指数和最大单项污染指数。内梅罗指数法过分强调了最大的污染物对环境的影响和作用,易造成评价结果的失真。为克服此缺点,采用姚志麒^[29]对平均值赋予较大权系数(x/y)的方法,其中: x 表示最大单项污染指数, y 表示平均单项污染指数,则上式写作:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{1 \cdot x^2 + (x/y)y^2}{1+x/y}} = \sqrt{xy} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum P_i\right) \cdot P_{\text{max}}} \quad (3)$$

表 1 北京市土壤重金属含量背景值

Table 1 The background concentration of soil heavy metals in Beijing

重金属	Cr ⁽¹⁾	Ni ⁽¹⁾	Cu ⁽¹⁾	Zn ⁽¹⁾	As ⁽¹⁾	Cd ⁽¹⁾	Pb ⁽¹⁾	Hg ⁽²⁾
背景值/mg·kg ⁻¹	29.80	26.80	18.70	57.50	7.09	0.119	24.60	0.08

注:1)土壤 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的背景值引自陈同斌等的《北京市土壤重金属背景值的系统研究》;2)土壤 Hg 的背景值来自李健等的《环境背景值数据手册》,下同。

2 结果与分析

2.1 土壤中重金属的统计对比分析

经偏度-峰度检验($P < 0.05$),土壤中 8 种重金属都不符合正态分布^[30],经对数转化后,均基本服从对

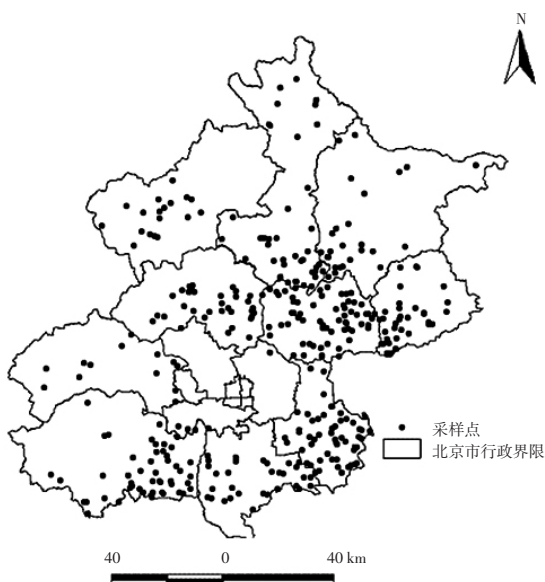


图 1 土壤采样点位置图

Figure 1 Location of sampling sits shown in the sketch map of Beijing

数正态分布。表 2 为研究区内土壤重金属的含量统计结果。从表中可以看出,8 种重金属的变差(最大值减最小值)分别为:Cr 55.80 mg·kg⁻¹、Ni 30.68 mg·kg⁻¹、Cu 29.09 mg·kg⁻¹、Zn 74.82 mg·kg⁻¹、As 12.12 mg·kg⁻¹、Cd 0.225 mg·kg⁻¹、Pb 27.34 mg·kg⁻¹、Hg 0.19 mg·kg⁻¹。样点之间重金属含量差异最大的是 Hg, 变异系数 49.1%,最小的为 Zn,变异系数 18.6%。

土壤中 Cr 的平均含量为 53.61 mg·kg⁻¹, 比其相应的背景值高 79.9%, 其最大值为 87.40 mg·kg⁻¹, 比相应的背景值高出 1.93 倍。土壤 Cu、Zn、As、Cd 的平均含量分别比其相应的背景值高 17.4%、13.8%、28.9%、5.0%,最大值比其相应的背景值高出 1.05 倍、0.79 倍、1.07 倍、1.09 倍。虽然 Ni 和 Pb 含量的平均值比相应的背景值低 7.9%和 29.2%, 但二者的最大值却比相应的背景值高出 0.52 倍和 0.39 倍。Hg 含量的平均值与李健等^[27]研究的北京市 Hg 的背景值一致, 最大值比背景值高出 1.38 倍。由于背景值是不受或者很少受人类活动影响的情况下土壤原来固有的元素含量水平,所以北京市农业土壤有一定程度的 Cr、Cu、Zn、As、Cd 积累,Ni、Pb 积累并不严重, 但 8 种重金属都有部分样点含量偏高,存在着污染的威胁。

李晓秀等^[10]对北京市基本农田的土壤重金属含量统计分析得到 Cr、Cu、As、Cd、Pb、Hg 等平均值分别为 24.51、24.94、7.86、0.144、17.85、0.038 mg·kg⁻¹, 其中 Cu 和 Cd 比本研究高 13.6%和 15.2%, 而 Cr、As、Pb、Hg 比本研究结果低 118.7%、16.3%、6.7%、110.5%;陈晶中等^[31]对北京城市边缘土壤重金属污染研究得到的 As 含量(均值 7.67 mg·kg⁻¹)比本研究结果低 19.2%,Cd(0.168 mg·kg⁻¹)和 Pb(38.3 mg·kg⁻¹)含量比本研究结果高 34.4%、101.2%。北京市菜地土壤中重金属 Cr 比本研究结果低,Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 含量均比本研究结果高^[11-17]。可见,本研究结果与前人研究结果存在着差异。造成差异的原因可能是:采样和监测时间不同、采样数量及采样地区不同。李晓秀等的研究中,采样点集中在北京郊区县具有代表性的 45 处基本农田,对整个北京市来说,采样数量偏少;陈晶中等的研究中采样数量达 220 个之多,但采样地仅涉及到平原区,反映的是城市边缘土壤重金属含量;北京市菜地土壤的重金属研究中,土壤采样点为 54 个左右(As 为 39 个),且主要位于平原区(部分样点位于昌平区),研究结果反映的是高投入强度的菜地中重金属含量;与其他研究相比,本研究具有数据较新(2007 年)、样品量大(370 个有效数据)的特点,

表 2 北京市农业土壤重金属含量基本统计对比

Table 2 Comparison of concentrations of heavy metals in the agricultural soils of Beijing

重金属	研究样本数/个	重金属含量/mg·kg ⁻¹					
		最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	
Cr	本研究	370	31.60	87.40	53.61	11.30	21.1%
	背景值 ¹⁾	116	10.90	61.10	29.80	9.29	—
Ni	本研究	370	10.09	40.77	24.84	5.44	21.9%
	背景值 ¹⁾	116	11.00	59.30	26.80	7.90	—
Cu	本研究	370	9.21	38.30	21.95	4.77	21.7%
	背景值 ¹⁾	117	6.00	37.90	18.70	6.33	—
Zn	本研究	370	28.50	103.32	65.42	12.20	18.6%
	背景值 ¹⁾	117	27.90	119.80	57.50	16.29	—
As	本研究	370	2.57	14.69	9.14	2.02	22.1%
	背景值 ¹⁾	115	1.39	18.85	7.09	3.22	—
Cd	本研究	370	0.024	0.249	0.125	0.04	31.2%
	背景值 ¹⁾	117	0.032	0.632	0.119	0.112	—
Pb	本研究	370	6.88	34.22	19.04	4.64	24.4%
	背景值 ¹⁾	101	11.50	38.20	24.60	5.08	—
Hg	本研究	370	0.00	0.19	0.08	0.04	49.1%
	背景值 ²⁾	—	—	—	0.08	—	—

且样点均匀分布在北京市的农业土壤中,有一定的代表性。

2.2 土壤重金属环境质量评价结果

若以国家土壤环境质量二级标准来评价,本研究中所有的土壤样点都处于清洁无污染状态,适合北京发展都市型现代农业的要求。但为了更准确地评价近年来北京市农业活动对土壤带来的环境压力,本研究选取北京市土壤重金属背景值作为标准来评价土壤环境质量。

评价结果见表 3。参照国家土壤环境质量标准,本文将 $P_i \leq 0.7$ 的土壤样点定义为清洁无污染, $0.7 < P_i \leq 1$ 定义为尚清洁(警戒限), $1 < P_i \leq 2$ 定义为轻度污染, $P_i > 2$ 定义为中度污染。 $P_{\text{综}}$ 也按此标准划分等级。从单因子污染指数来说,重金属的污染程度依次为 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Pb}$ 。所有土壤样点中 Cr 都处于污染状态,其中 27.8%的样点为中度污染;Cu、Zn、As、Cd 污染也比较严重,分别有 74.6%、74.3%、85.1%、54.9%的样点处于轻度污染状态,还有极个别样点属于中度污染;Ni、Pb、Hg 污染相对较轻,处于清洁和尚清洁的样点数占总样点数的 64.3%、88.6%、61.6%。综合污染指数的范围为 0.96~2.16,平均值为 1.45,划分等级后,几乎所有的土壤样点都属于轻度污染。

本研究的土壤样点都采自农业土壤。目前北京市近郊城乡交错的平原地带,是北京的蔬菜集中生产地区,远郊平原农村地带,是京郊粮食和畜产品的主产区,远郊山区地带是北京林果产品的主产区。农业用地数量较多,相应地投入到农业用地中有机肥、化肥、农药的强度也较大。据统计,2005 年北京市耕地面积 $22.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (菜地: $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、园地 $11.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 牧草地 $1\,982 \text{ hm}^2$, 可施肥农用地面积 $34.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中园地、菜地占可施肥土地面积的 39.3%, 作物的和牧草地占可施肥土地面积的 60.7%^[32]; 总的化肥使用量 $14.8 \times 10^4 \text{ t}$, 其中氮肥 $7.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、磷肥 $1.2 \times 10^4 \text{ t}$ 、复合肥 $5.2 \times 10^4 \text{ t}$, 农药使用量为 $4\,668 \text{ t}$ ^[33]。另外,北京市畜禽养殖规模较大,需要的养殖饲料较多,畜禽粪便产量也大。据统计,2005 年北京市年末畜禽存栏数羊 1.3×10^6 只、猪 2.2×10^6 头、肉牛、役牛及马驴骡 1.7×10^5 头、奶牛 1.6×10^5 头、禽类 3.9×10^7 只^[32]。到 2000 年为止,北京市污水灌溉的面积约为 $8 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 年污水灌溉量约 $2.2 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占全市污水排放量的 27%, 污灌区主要分布于通州、大兴和朝阳区^[34]。

表 3 北京市农业土壤重金属污染评价结果

Table 3 Assessment of heavy metals pollution in the agricultural soils of Beijing

重金属	污染指数/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			样本污染点数/个			
	最小值	最大值	平均值	清洁	警戒限	轻度污染	中度污染
Cr	1.06	2.93	1.80	0	0	267	103
Ni	0.38	1.52	0.93	38	200	132	0
Cu	0.49	2.05	1.17	8	85	276	1
Zn	0.49	1.79	1.13	6	89	275	0
As	0.36	2.07	1.29	7	44	315	4
Cd	0.20	2.09	1.05	37	127	203	3
Pb	0.28	1.39	0.77	136	192	42	0
Hg	0	2.38	0.96	118	110	131	11
$P_{\text{综}}$	0.96	2.16	1.45	0	5	362	3

有研究表明,农业生产中畜禽粪便、化肥、农药的大量施用、污水灌溉是土壤重金属污染的主要途径^[35-37]。Nicholson 等^[37]对 England 和 Wales 地区农业土壤重金属污染源研究表明,Zn 和 Cu 有 40% 来自畜禽粪便,8%~16% 来自污水灌溉;6%~27% 的 Ni、Pb、As 来自畜禽粪便;Cd 有 30% 来自有机肥料,11% 来自畜禽粪便;Cr 来自化肥尤其是磷肥的施用和污水灌溉。化肥中重金属含量一般是磷肥>复合肥>钾肥>氮肥,随着磷肥和复合肥的大量施用,土壤 Cd、Cr、As 含量不断增加^[38-40];含 As 农药以及含 Cu 杀菌剂长期使用会

导致土壤 Cu、As 的积累^[24,41]。污水中通常含有较高的 Cd、Cr、Pb、Zn、Hg 等,不合理的污灌方式会使大量的重金属在土壤中积累^[42-43]。另外,大气沉降也是土壤重金属的污染源之一^[6],其中 Pb 来自含铅汽油的燃烧,Cu、Zn、Cd 来自汽车排放的尾气、轮胎磨损产生的粉尘、润滑剂以及工业废气,As 来自煤的燃烧^[19,44-46]。Nicholson 等^[37]研究认为,38%~48% 的 Cu 和 Zn、55%~77% 的 Ni、Pb 和 As、53% 的 Cd 以及 85% 的 Hg 都来自大气沉降。本研究有部分土壤样点受交通运输、农业机械化、工矿企业以及畜禽养殖场的影响,重金属含量较高。

3 结论

对北京市农业土壤重金属含量及污染评价结果表明:Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 含量的平均值分别为 53.61、24.84、21.95、65.42、9.14、0.125、19.04、0.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Cr、Cu、Zn、As、Cd 高于北京市土壤重金属背景值,Hg 与背景值一致,Ni、Pb 则低于背景值。就 8 种重金属含量的最大值来说,分别超出其相应的背景值 1.93 倍、0.52 倍、1.05 倍、0.79 倍、1.07 倍、1.09 倍、0.39 倍、1.38 倍,都存在着一定的积累趋势。从单因子评价结果来说,Cr 污染最严重,其次为 As、Cu、Zn、Cd、Hg、Ni、Pb,综合评价结果则几乎所有的样点都处于轻度污染状态。可见,近年来北京市农业生产带来的重金属积累现象比较严重,应引起人们的重点关注,尽早采取措施,防止农业土壤环境恶化,影响北京市现代都市农业的发展。

参考文献:

- [1] Singh O V, Labana S, Pandey G. Phytoremediation: an overview of metallicion decontamination from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61: 405-412.
- [2] 杨 军,郑袁明,陈同斌,等.北京凉风灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1175-1181.
YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng irrigation area, Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1175-1181.
- [3] 马 瑾,潘根兴,万洪富,等.珠江三角洲典型区域土壤重金属污染探查研究[J]. *土壤通报*, 2004, 35(5): 636-638.
MA Jin, PAN Gen-xing, WAN Hong-fu, et al. Investigation on heavy metal pollution in a typical area of the Pearl River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 636-638.
- [4] Celine S L, Li X D, Shi W Z, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 356:

- 45-61.
- [5] Kelly J, Thornton I, Simpson P R. Urban geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and nonindustrial areas of Britain[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11(1-2):363-370.
- [6] Li X, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16:1361-1368.
- [7] Mielke H W, Gonzales C R, Smith M K, et al. Quantities and associations of lead, zinc, cadmium, manganese, chromium, nickel, vanadium and copper in fresh Mississippi delta alluvium and New Orleans alluvial soils[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 246:249-259.
- [8] Tjihuis L, Brattli B, Sæther O M. A geochemical survey of topsoil in the city of Oslo, Norway[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2002, 24(1):67-94.
- [9] Zhang C S. Using multivariate analysis and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142:501-511.
- [10] 李晓秀, 陆安祥, 王纪华, 等. 北京地区基本农田土壤环境质量分析与评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2):60-63.
LI Xiao-xiu, LU An-xiang, WANG Ji-hua, et al. Analysis and assessment of soil environmental quality of some farmlands in Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2):60-63.
- [11] 黄泽春, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2006, 25(3):439-448.
HUANG Ze-chun, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. A survey of Zinc concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3):439-448.
- [12] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006a, 26(8):1343-1353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of Cd concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006a, 26(8):1343-1353.
- [13] 宋波, 高定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2006b, 26(10):1707-1715.
SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tong-bin, et al. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006b, 26(10):1707-1715.
- [14] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镍含量及其健康风险[J]. 自然资源学报, 2006a, 21(3):349-361.
CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of Nickel concentrations in vegetables and vegetable soils of Beijing and their healthy risk[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006a, 21(3):349-361.
- [15] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J]. 中国农业科学, 2006b, 39(8):1589-1597.
CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of Lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their healthy risks[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006b, 39(8):1589-1597.
- [16] 陈同斌, 宋波, 郑袁明, 等. 北京市蔬菜和菜地土壤砷含量及其健康风险分析[J]. 地理学报, 2006c, 61(3):297-310.
CHEN Tong-bin, SONG Bo, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of Arsenic concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006c, 61(3):297-310.
- [17] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜中铜含量及其健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1093-1101.
ZHENG Yuan-ming, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. A survey of Copper concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1093-1101.
- [18] 卢桂兰, 韩梅, 李发生, 等. 北京市通州污灌区土壤环境质量监测和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 中国环境监测, 2005, 21(5):54-56.
LU Gui-lan, HAN Mei, LI Fa-sheng, et al. Monitoring of soil environment pollution and contamination by heavy metals in Tongzhou irrigation area of Beijing city[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(5):54-56.
- [19] Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. *Environment International*, 2005, 31:805-812.
- [20] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006a, 21(1):64-72.
ZHENG Yuan-ming, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006a, 21(1):64-72.
- [21] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J]. 地理学报, 2005b, 60(5):791-797.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, CHEN Huang, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005b, 60(5):791-797.
- [22] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累[J]. 资源科学, 2005c, 27(6):162-166.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, ZHENG Guo-di, et al. Chromium and Nickel accumulations in soils under different land uses in Beijing Municipality[J]. *Resources Science*, 2005c, 27(6):162-166.
- [23] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响-以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2005d, 20(5):690-696.
ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, ZHENG Guo-di, et al. Soil Copper accumulation under different land use types-the case of Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005d, 20(5):690-696.
- [24] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式类型的土壤镉含量特征[J]. 地理研究, 2005e, 24(4):543-548.
ZHENG Yuan-ming, LUO Jin-fa, CHEN Tong-bin, et al. Cadmium accumulation in soils for different land uses in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2005e, 24(4):543-548.
- [25] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征[J]. 地理研究, 2005a, 24(2):229-235.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2005a, 24(2):229-235.

- [26] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市土壤重金属背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122.
CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 117-122.
- [27] 李 健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 55.
LI Jian, ZHENG Chun-jiang. Data book of environmental background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 55.
- [28] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范[S]. 2004. 24-25.
State Environmental Protection Administration. The technical specification for soil environmental monitoring[S]. 2004. 24-25.
- [29] 姚志麒. 关于采用环境质量指数的几个问题[J]. 环境科学, 1979, 2: 37-45.
YAO Z Q. Some problems about environmental quality index[J]. *Environmental Science*, 1979, 2: 37-45.
- [30] 陶 澍. 应用数理统计方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 183-186.
TAO Shu. Applied mathematical statistics method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994: 183-186.
- [31] 陈晶中, 陈 杰, 谢学俭, 等. 北京城市边缘土壤重金属污染物特征分布[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 149-152.
CHEN Jing-zhong, CHEN Jie, XIE Xue-jian, et al. The distribution character of heavy metals in peri-urban area of Beijing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 149-152.
- [32] 张凤荣, 赵华甫, 陈 阜, 等. 都市型现代农业产业布局[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 中国农业大学出版社, 2007: 194.
ZHANG Feng-rong, ZHAO Hua-fu, CHEN Fu, et al. Industrial layout of metropolitan modern agriculture [M]. Beijing: China University of Petroleum Press, China Agricultural University Press, 2007: 194.
- [33] 国家统计局, 2005. 2007-12-18. [http://www. stats. gov. cn/tjsj/qtsj/hjtjl/hjtjsj2005](http://www.stats.gov.cn/tjsj/qtsj/hjtjl/hjtjsj2005).
National Bureau of Statistics, 2005. 2007-12-18. <http://www. stats. gov. cn/tjsj/qtsj/hjtjl/hjtjsj2005>.
- [34] 马素英. 北京地区污灌土壤重金属镉吸附特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
MA Su-ying. Study on the characteristics of Cadmium sorption in sewage irrigating soils in Beijing[D]. China Agricultural University, 2006.
- [35] Siamwalla A. Agricultural sustainability in rapidly industrializing Asian economies [C]// integration of sustainable agriculture and rural development in agricultural policy, FAO/Winrock International, 1996.
- [36] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Heavy metal pollution in soils in China: status and countermeasures[J]. *Ambio*, 1999, 28: 130-134.
- [37] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311: 205-219.
- [38] Taylor M D. Accumulation of cadmium derived from fertilizers in New Zealand[J]. *Soil Sci Total Environ*, 1997, 208: 123-126.
- [39] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 188-213.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 188-213.
- [40] 丛艳国, 魏立华. 土壤环境重金属污染物来源的现状分析[J]. 现代化农业, 2002, 1: 18-20.
CONG Yan-guo, WEI Li-hua. Analysis of current circumstance of pollution sources of soil heavy metals[J]. *Modernizing Agriculture*, 2002, 1: 18-20.
- [41] 谢正苗, 廖 敏, 黄昌勇. 砷污染对植物和人体健康的影响及防治对策[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(7): 17-21.
XIE Zheng-miao, LIAO Min, HUANG Chang-yong. Effects of Arsenic pollution on plants and human health and countermeasures[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1997, 4(7): 17-21.
- [42] 张乃明, 邢承玉, 贾润山, 等. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1): 21-23.
ZHANG Nai-ming, XING Cheng-yu, JIA Run-shan, et al. Research on heavy metals pollution in Taiyuan sewage-irrigated soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(1): 21-23.
- [43] Bansal O P. Heavy metal pollution of soils and plants due to sewage irrigation[J]. *Indian Environmental Health*, 1998, 40: 51-52.
- [44] Markus J A, Mc Bratney A B. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34: 453-465.
- [45] Thornton I. Metal contamination of soils in urban areas[C]//Bullock P, Gregory P J (Eds). Soils in urban environment. Blackwell Oxford, 1991. 47-75.
- [46] Walker S, Griffin S. Site-specific data confirm arsenic exposure predicted by the U. S. Environmental Protection Agency[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1998, 106: 133-139.